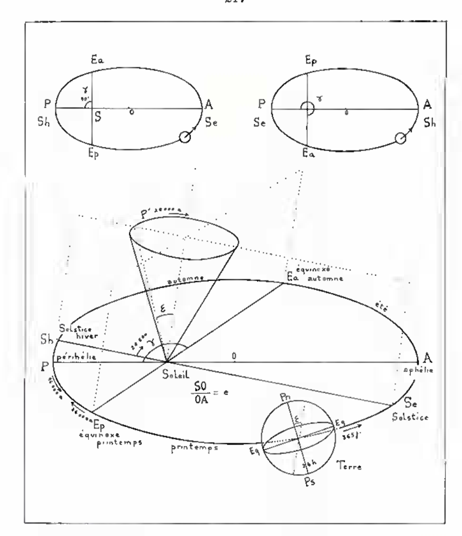
LA THÉORIE ASTRONOMIQUE DE E. BERNARD SUR LE BALANCEMENT DE L'ÉQUATEUR CALORIFIQUE ET SES CONSÉQUENCES SUR LES DÉPLACEMENTS DE LA FORÊT ÉQUATORIALE AFRICAINE

par A. Aubréville

Il est bien connu que les régimes pluviométriques des latitudes intertropicales dépendent directement et étroitement du régime de l'insolation. Rappelons que cette énergie en un lieu de latitude φ est appelée l'insolation du parallèle φ. Elle est mesurée en calories par cm^2, à la limite de l'atmosphère sur une surface horizontale. Elle est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance de la Terre au Soleil et au cosinus de l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport au zénith du lieu. Pour une latitude et une journée déterminées elle est liée aux valeurs momentanées de trois éléments astronomiques variables du mouvement de la Terre, éléments dont les variations sont dues aux actions gravifiques conjuguées exercées par les diverses planètes. De l'excentricité e de l'ellipse terrestre qui mesure le degré d'aplatissement de l'orbite, dépendent les écarts plus ou moins grands de l'insolation aux diverses saisons astronomiques en rapport avec les distances de la Terre au Soleil durant ces saisons. Il est de même de la conséquence de la position fluctuante de la Terre sur son orbite aux époques des solstices et des équinoxes rapportée au grand axe de l'ellipse c'est-à-dire à la position du périhélie et de l'aphélie. On se souvient que cette position varie dans le temps du fait de la précession des équinoxes dans le sens des aiguilles d'une montre, conséquence un mouvement de rotation de la ligne des pôles autour de la perpendiculaire au plan de l'orbite. On définit cette position (ou longitude) du périhélie par l'angle γ que fait sur le plan de l'orbite terrestre la ligne joignant le soleil à la position de la Terre à l'équinoxe d'automne avec la ligne joignant le Soleil au périhélie.

Enfin le troisième élément variable est l'obliquité de l'écliptique ε, angle que fait le plan du mouvement apparent du soleil sur la sphère terrestre avec le plan de l'équateur terrestre, ou encore inclinaison de la ligne des pôles sur le plan de l'orbite terrestre. Plus cette obliquité est grande, plus grandes sont les différences de l'insolation entre les saisons et inversement.

Les variations séculaires lentes de ces éléments astronomiques qui influencent le régime de l'insolation dans le cours des temps sont calculables avec précision par les lois de la mécanique terrestre. Elles sont périodiques. Elles ont été calculées en 1950 par les astronomes de l'Uni-



versité de Yale, D. Brouwer et A. J. J. Van Woerkom pour le dernier million d'années.

	Période moyenne en années	*Amplitude maximale*	*Actuellement*
Excentricité.............	95.000	0 — 0,053	0,0167
Longitude du périhélie...	20.600	0 — 360°	102° 05'
Obliquité de l'écliptique..	41.000	21° 8' — 24° 4'	23° 27'

Cet exposé préliminaire peut paraître étrange dans une revue de botanique, mais il est indispensable pour comprendre toute la valeur des conséquences que tireront de ces considérations un mathématicien comme MILANKOVITCH et un climatologiste comme E. BERNARD pour expliquer, le premier, les glaciations quaternaires des latitudes élevées et le second le déplacement périodique de l'équateur calorifique et l'alternance des phases pluviales et interpluviales que l'on a cru constater dans les régions équatoriales, avec toutes les incidences que cela implique pour les climats et les végétations associés. La théorie astronomique de MILANKOVITCH date de 1920 [1].

Étienne A. BERNARD, Maître de Conférences à l'Université catholique de Louvain, sur la base de cette théorie vient d'étudier les fluctuations séculaires du régime d'insolation des latitudes tropicales et leurs effets sur les régimes thermiques et pluviométriques de l'Afrique ainsi que leurs conséquences pour la végétation dans deux mémoires publiés en 1962 [2]. Ce sont ces théories que nous nous proposons de présenter et d'analyser très sommairement ici, sans entrer dans le vif des développements mathématiques et climatophysiques qui constituent la charpente des ouvrages de BERNARD. Il était toutefois indispensable de rappeler brièvement les données de base de la théorie en insistant sur le principe d'une méthode fondée sur l'application de lois astronomiques pour le calcul des régimes d'insolation au quaternaire conduisant donc à des déductions mathématiques indiscutables.

Des équations permettent en particulier de calculer la valeur de l'insolation journalière des solstices et des équinoxes en fonction de la latitude φ et des 3 éléments astronomiques du mouvement de la Terre dont j'ai rappelé la définition : e, γ, et ε. BERNARD considère en outre un équateur d'insolation défini par une insolation respectivement égale des deux maxima d'équinoxe et des deux minima des solstices. Ce serait le cas de l'équateur géographique si aux deux solstices la Terre était à la même distance du Soleil ou si l'excentricité de l'orbite terrestre était nulle. On sait que l'équateur géographique jouit d'une insolation peu variable d'une saison à l'autre, mais cependant un peu différente du solstice d'été au solstice d'hiver en raison des différences de distances de la Terre au Soleil à ces époques. Sous l'équateur calorifique ou l'équateur d'insolation, l'écart d'insolation aux semestres les plus chauds ou aux solstices devient nul. C'est une caractéristique privilégiée que l'on attribue communément — mais inexactement à l'équateur terrestre. — Les calculs d'insolation permettent d'établir l'équation qui lie la latitude φ_c de l'équateur calorifique aux valeurs séculaires des 3 variables e, γ et ε.

1. Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire.

2. Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux du Quaternaire africain. Mém. Ac. Roy. Sc. O.M. **2**, 1 : 232 p. Bruxelles (1962). Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21 000 ans et ses causes = migrations des pôles ou dérive des continents.

C'est une fonction sinusoïdale $\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{4\,e}{\pi} \frac{\sin \gamma}{\sin \varepsilon}$. Comme les 3 variables sont périodiques, il en résulte que cette latitude φ_c varie elle aussi suivant une certaine période laquelle dépend surtout de la variable qui a la plus forte amplitude dans la période la plus courte, c'est-à-dire γ la longitude du périhélie, ou position relative de la Terre sur son orbite à l'époque de l'équinoxe d'automne. *Le calcul montre que cette latitude peut atteindre 11° aux époques de forte excentricité, et que l'équateur calorifique subit d'incessants balancements autour de l'équateur géographique, avec la périodicité moyenne de γ c'est-à-dire de 20600 ans.* Actuellement l'équateur calorifique se trouverait à 3° 02' dans l'hémisphère nord. Voici quelques valeurs calculées par BERNARD, pour le quaternaire :

ANNÉES			
577,900	8° 36' S	(γ = 270°, ε maximum)	
220.300	7° 09' S	(γ = 270°, ε maximum)	
208.000	7° 35' N	(γ = 90°, ε maximum)	
33.200	2° 48' S	(γ = 270°, ε minimum)	Grande glaciation antarctique.
22.100	3° 20' N	(γ = 90°, ε minimum)	Grande glaciation arctique.
11.200	3° 21' S		
1963	3° 02' N		

Ainsi au cours d'une période de 20 600 ans l'équateur d'insolation passe deux fois en tout point d'un anneau équatorial de 9-10° d'ouverture, c'est-à-dire qu'il règnera en ce lieu à deux époques séparées de 10 300 ans environ les conditions de ce qu'on appelle ordinairement un régime thermique équatorial et un régime pluviométrique équatorial associé à ce dernier, caractérisés par une double périodicité de deux maxima et deux minima annuels, une amplitude thermique faible, et corrélativement des pluies toute l'année. Le régime pluviométrique équatorial, BERNARD l'appelle un régime d'isopluvialité! De part et d'autre de cet équateur d'insolation en s'éloignant vers le nord et vers le sud, les différences entre les insolations et températures solsticielles s'accentuent, le régime thermique et le régime pluviométrique concomitant ne comportant plus qu'un seul maximum; le climat devient le climat tropical classique à une saison sèche hivernale et une saison estivale des pluies, type du régime pluviométrique que BERNARD nomme displuvial.

On aperçoit immédiatement les conséquences de ce balancement de l'équateur calorifique de part et d'autre de l'équateur; en chaque lieu de basse latitude le climat devient équatorial à une époque t puis tropical, puis de nouveau équatorial à l'époque t + 10 300 ans, puis redevient tropical, et après un retour de l'équateur, encore équatorial au temps t + 20 600 ans, etc.... Il faut bien admettre que tous les types de végétation tropicale qui écologiquement sont adaptés à ces deux types climatiques comportant soit une longue saison sèche soit une pluviosité permanente

ou quasi permanente, se succéderont en ce lieu; c'est-à-dire qu'au passage de l'équateur thermique la forêt dense humide et sa flore auront tendance à s'établir, puis les conditions lui devenant moins favorables avec l'apparition puis l'accentuation d'une saison sèche, elle aura tendance à faire place à une forêt dense décidue, puis à une forêt sèche et peut-être à l'époque des maxima de latitude atteint par l'équateur d'insolation, à des formations de savanes boisées. La zone de forêt dense humide se déplacera dans l'anneau équatorial entre les latitudes 9-10° N. et 9-10° S. durant la période de 20 600 ans. Actuellement si l'équateur d'insolation calculé est à 3°02′ N., la forêt équatoriale du cœur de l'Afrique devrait s'étaler de quelques 3-4° de part et d'autre de cette latitude par analogie avec ses limites réelles au centre de l'Afrique qui sont actuellement vers 3-4° de part et d'autre de l'équateur géographique et sa largeur présente de 7-8°. Si la forêt dense avait suivi la vitesse de migration climatique, ses lisières nord devraient être vers la latitude de 7° N. et ses lisières sud à 1°5. Constatons ainsi un retard très accentué de l'adaptation phytogéographique. Dans quelques 9 400 ans, pour satisfaire à la période de balancement de 20 600 ans l'équateur calorifique devrait être à la latitude de 3°21′ latitude S. qui était la sienne il y a 11 200 ans d'après les calculs de Bernard.

Des positions qu'il a calculées pour l'équateur calorifique : 7°09 S. en l'an quaternaire — 220 300, et 7°35 N. dans l'année — 208 800, il résulte qu'à cette époque le déplacement en 11 500 ans fut de 14°44′ soit, d'après les chiffres cités par Bernard, 1642 km ou encore 143 m par an, vitesse moyenne, qui devait être plus grande dans les positions intermédiaires les plus éloignées des positions extrêmes où elle s'annule.

Bernard interprète ainsi d'un point de vue phytogéographique les conséquences de la théorie du balancement de l'équateur d'insolation. *La forêt dense humide s'est étendue dans l'hémisphère Sud, sur l'Angola, le Haut Kalanga, la Rhodésie du Nord et le Tanganika à l'époque des maxima des déplacements vers le sud. Dans l'hémisphère nord elle s'est installée entre les 5e et 15e latitude N. en pleine zone soudanaise actuelle à l'époque du déplacement maximum vers le nord.* Ces balancements thermiques et ces pulsations climatiques et phytogéographiques ont pu être répétés de nombreuses fois au quaternaire à la période de 20 600 ans environ.

Cet état d'équilibre instable des climats et des formations végétales de la zone équatoriale géographique serait ainsi permanent. Cependant il nous paraît inconcevable que les formations de forêt dense humide puissent, en raison de leur inertie suivre un régime aussi rapide. Peut-être est-ce là la raison pour laquelle elles chevauchent aujourd'hui encore l'équateur géographique qui occupe une position moyenne entre les positions extrêmes de l'équateur d'insolation, position donc favorable à une certaine stabilité biologique propice à l'état forestier. Bernard constate (p. 97) l'écart actuel de 4° entre l'équateur pluviométrique observé — auquel est associé d'une façon très compréhensible la dis-

tribution actuelle de la forêt dense congolaise — et l'équateur calorifique calculé. Il voit la cause de ce déphasage dans un effet de continentalité qu'exercerait le bloc massif de l'Afrique septentrionale. Cette notion aurait demandé à être explicitée. La connaissance de la climatologie actuelle de l'Afrique montre que l'action océanique atlantique s'exerce jusqu'en plein cœur de l'Afrique tropicale boréale, et peut-être même s'étend-elle au travers de presque tout le continent, sans quoi il n'y aurait pas de saison pluvieuse dans la zone soudanienne après le dessèchement de la saison sèche; sa limite d'influence coïncide avec l'apparition du Sahara. Il pourrait y avoir dans cette constatation d'un écart important de 4° un argument majeur contre, non la théorie du balancement du climat d'insolation mais contre celle du balancement d'un climat thermique et celle subséquente du régime pluviométrique, car enfin d'après les chiffres de BERNARD, l'équateur calorifique coïncidait avec l'équateur géographique il y a quelques 5 000 ans, et depuis ce temps, ni le régime pluviométrique équatorial qui devrait s'instaurer aujourd'hui vers les 3° latitude N., ni la forêt dense humide ne se seraient déplacés vers l'hémisphère Nord!

Par ailleurs peut-on concevoir une vitesse des lisières de la forêt dense à raison de 143 m par an, vitesse moyenne de déplacement de l'équateur d'insolation. Vitesse moyenne de régression? Peut-être, non par recul mètre par mètre des lisières, mais par dépérissement par grandes masses, absence de régénération, envahissement des herbages, savanisation généralisée, surtout si des incendies accélèrent l'extinction. Il est bien connu qu'un couvert forestier peut disparaître facilement, tandis qu'une reconstitution forestière est lente. Je sais bien qu'il ne faut pas non plus imaginer une migration forestière mètre après mètre. Les photographies aériennes nous offrent aujourd'hui des images de formations forestières en progression spontanée dans les pays tropicaux. Celle-ci s'effectue d'abord par envahissement des thalwegs, des bandes boisées avançant dans le pays se ramifiant en suivant tous les couloirs d'érosion, assez rapidement même lorsque les ravins d'érosion sont de date récente, elles finissent par grossir, par s'anastomoser, enclavant des savanes. La colonisation directe de ces enclaves peut alors se faire par semis. Quelquefois la progression se fait par des éléments forestiers avancés qui s'installent en îlots en avant des lisières sur des sols propices, propagés par les animaux et le vent. Ce ne sont d'abord que des petits groupements d'arbrisseaux et de lianes; quelques arbres s'y établissent ensuite. Ces taches forestières grossissent et se joignent aussi quelque jour. Bref la forêt progresse dans les savanes comme un mycelium de champignon dans le bois, et sa vitesse de progression n'est qu'une donnée statistique qui n'a de signification que si elle porte sur des temps très grands.

Il n'en reste pas moins qu'un retard de progression de 4° en 4-5000 ans demande une explication et il semble que BERNARD n'ait pas marqué beaucoup d'intérêt à éclairer ce problème.

Il est curieux de constater que les conclusions de BERNARD ressemblent beaucoup au premier abord à l'hypothèse que j'ai exposée récem-

ment [1] où il est question également d'une « descente » de la forêt dense humide africaine dans l'hémisphère Sud, il y a quelques milliers d'années seulement. Mon hypothèse, purement intuitive, était étayée par les traces que ce déplacement de la bande forestière équatoriale africaine aurait laissé dans la distribution présente de la végétation forestière et de la flore des formations humides. En particulier j'avais insisté sur l'existence des grandes savanes des zones subéquatoriales humides que j'ai qualifiées d'aberrantes au point de vue écologique et qui me paraissent être des témoins de zones d'anciennes forêts humides détruites par l'aridification du climat et aujourd'hui en voie de recolonisation par la végétation forestière. Comme BERNARD j'avais supposé que cette forêt équatoriale avait largement atteint le Katanga et le Tanganika, soit une dizaine de degrés au sud de leurs lisières actuelles. Cette proposition ne résultait d'aucun calcul, mais d'un essai d'interprétation de faits phytogéographiques et floristiques. Cependant en dépit de cette coïncidence curieuse, nos conceptions sur le déplacement de la forêt équatoriale africaine diffèrent fondamentalement. Pour BERNARD ces déplacements sont périodiques étant une conséquence des fluctuations périodiques des éléments du mouvement de la Terre sur son orbite. Quant à moi, je les considérais comme des perturbations climatiques exceptionnelles survenues brusquement au quaternaire, explicables peut-être soit par des déplacements des pôles ou des dérives continentales, eux-mêmes ayant des causes inconnues. Le balancement de l'équateur calorifique de BERNARD et de MILANKOVITCH est un mouvement alternatif d'amplitude variable, qui se manifeste depuis les temps les plus anciens, à la période de 20 600 ans. Là où il ne distingue que des épisodes se reproduisant régulièrement, je n'ai conçu que des divagations catastrophiques qui ne se seraient produites qu'à 3 ou 4 reprises au quaternaire et liées chronologiquement aux glaciations.

Dans le présent exposé j'ai considéré comme évidentes les relations causales allant du climat d'insolation au régime thermique puis au régime pluviométrique. Elles sont en effet assez évidentes dans les pays équatoriaux où les pluies sont soit des pluies de convertion (pluies zénithales) dues à l'échauffement local du sol, soit des pluies de mousson dues au surchauffement du continent par rapport aux eaux plus froides des océans qui le bordent. Il est bien connu que ces deux causes agissant simultanément les pluies des basses latitudes sont essentiellement des pluies estivales. Mais les mathématiciens ne sauraient se contenter de ce schéma élémentaire et BERNARD n'a pas manqué de rechercher une démonstration quantitative plus convaincante. En effet ce climat d'insolation dont il calcule les facteurs est le climat théorique qui règne à la limite de l'atmosphère terrestre et qui est déterminé pour une latitude fixée et pour une période définie par la constante solaire, et les éléments e, γ et ε. Mais l'échauffement de la Terre et les mouvements des masses d'air sont une conséquence thermique de cette insolation et pour les

1. Adansonia. **2**, 1 (1962).

calculer il faut mettre en jeu des facteurs physiques nouveaux tels que l'albédo de la Terre c'est-à-dire le pouvoir réflecteur de sa surface, variable avec sa nature physique, la nature de son recouvrement végétal, puis la nébulosité. Donc pour passer de l'insolation thermique calculable avec certitude et précision au régime thermique de la surface terrestre, il faut recourir à des calculs de climatologie physique qui aboutissent à des équations semi-empiriques où interviennent des données expérimentales plus ou moins bien connues. C'est ainsi que BERNARD établit une formule liant une variation de la température absolue de la surface de la Terre à une variation de l'insolation en fonction de la nébulosité et de l'albédo planétaire pour une latitude déterminée. Ce passage des calculs d'astronomie aux calculs de climatologie physique est évidemment un point délicat des théories de MILANKOWITCH et de BERNARD.

Le but essentiel du premier était d'expliquer la formation des glaciations quaternaires simplement par un effet conjugué des éléments astronomiques fluctuants du mouvement de la Terre. En effet les saisons sont plus ou moins chaudes ou froides à une période déterminée suivant les valeurs qu'acquièrent durant cette période les éléments de ce mouvement. Lorsque dans les latitudes élevées — MILANKOWITCH avait fait ces calculs pour le 65e parallèle — l'été est relativement froid et l'hiver relativement doux, les conditions d'une grande extension glaciaire sont réunies. Ceci se produit dans l'hémisphère nord pour $\gamma = 90^\circ$ et ε minimum. Comme tous les 3 éléments e, γ et ε sont périodiques mais avec des périodes très différentes, les conditions qui provoquent la phase glaciaire ne sont réunies qu'assez exceptionnellement; elles sont apériodiques. Cela s'est produit plusieurs fois durant le dernier million d'années. Durant une glaciation Nord, les hautes latitudes australes connurent alors une phase interglaciaire et inversement. La grande glaciation australe se produisit quand $\gamma = 270^\circ$ et ε minimum. Notons que ces conclusions sont en désaccord avec celles de nombreux auteurs qui considèrent les glaciations comme synchrones dans les deux hémisphères.

La théorie astronomique de MILANKOWITCH a été combattue dans ses conséquences de climatologie physique. SIMPSON estima que les modifications thermiques dues aux variations séculaires de l'insolation étaient à peine de l'ordre de 1° pour les mois extrêmes de janvier et de juillet et qu'ainsi elles ne sauraient expliquer les considérables avances et reculs des calottes glaciaires quaternaires. BERNARD a repris tous les calculs de climatologie physique à partir de données physiques modernes et a conclu que les variations de l'insolation estivale pouvaient provoquer aux hautes latitudes des abaissements de température de -6° à -11°, ce qui suffirait à expliquer la genèse des inlandsis du quaternaire. Il a en outre établi une chronologie des périodes glaciaires au cours du Quaternaire par la méthode des coïncidences des éléments du mouvement de la Terre favorables aux glaciations.

Mais venons en plus précisément à la théorie propre à BERNARD des pluviaux et interpluviaux du quaternaire africain, qui est le titre même de son ouvrage. De nombreux faits ont été constatés en Afrique

tropicale qui donnent à penser que les climats ont varié durant le quaternaire, passant de la désertification à des états très humides ou réciproquement. Le balancement de l'équateur calorifique permet déjà d'expliquer une part de ces fluctuations comme nous l'avons déjà montré, un régime équatorial de pluies (à pluies régulières ou isopluvial) pouvant remplacer dans le temps, aux basses latitudes, un régime tropical ou displuvial à saison sèche plus ou moins longue et intense, et inversement. Néanmoins il a semblé à de nombreux auteurs qu'en Afrique tropicale, en dehors de toute question de régime pluviométrique proprement dit, des périodes de grande pluviosité avaient alterné avec des périodes de moindre pluviosité ou même de sécheresse. Et ils ont souvent tenté d'établir une corrélation entre les climats quaternaires de l'Afrique et de l'Europe reposant sur un synchronisme : glaciation = pluvial. Les glaciations dues à un refroidissement généralisé du Globe, auraient augmenté la pluviosité en zone tropicale. Les périodes interglaciaires correspondraient donc aux époques interpluviales africaines. Nous nous sommes déjà élevés contre ce raisonnement, et dans l'hypothèse théoriquement simple d'un déplacement des pôles, absolu ou relatif, nous avons montré comment par le décalage d'ensemble du système des zones climatiques en Afrique la partie nord du désert du Sahara devenait plus humide, tandis que la zone sahélo-soudanaise des steppes et savanes boisées se désertifiait, et que la bande de forêt dense humide migrait dans l'hémisphère austral suivant une zone pluviale équatoriale déplacée dans le sud et envahissant donc l'actuelle zone australe des savanes boisées et forêts claires. Le système des zones climatiques actuelles se succédant du pôle à l'équateur a toujours existé[1] puisqu'il résulte d'un gradient thermique pôle-équateur invariable. Mais il a pu être décalé dans les temps géologiques. Si nous superposons à ce schéma celui que nous offre la théorie du balancement de l'équateur thermique qui n'est pas incompatible avec notre hypothèse, nous avons un faisceau de causes complexes qui peuvent faire comprendre intuitivement pourquoi les climats de la zone intertropicale de l'Afrique ont pu être perturbés, et comment un lieu déterminé à pu être soumis alternativement à un régime plus ou moins sec ou humide.

D'autres auteurs ont refusé la concordance glacial = pluvial. Bernard se fondant toujours sur la théorie astronomique est de ceux-là. Pour lui les pluviaux intertropicaux à pluies de convection correspondent aux interglaciations; les pluviaux extratropicaux à pluies cycloniques ainsi que les phases de désertification en régions intertropicales sont corrélatifs des états de grande glaciation dans l'hémisphère correspondant. Je suis d'accord avec Bernard sur ces principes bien que nous soyons partis de bases fondamentalement différentes.

L'explication de périodes pluviales et interpluviales affectant aussi bien les régimes pluviométriques équatoriaux (isopluviaux) que les régimes proprement tropicaux (displuviaux) en zone tropicale est

1. Pour des valeurs de l'obliquité de l'écliptique proche de la valeur actuelle.

complexe. Elle est en rapport avec la théorie astronomique qui fait comprendre comment peuvent se manifester des saisons estivales à insolation particulièrement fortes donc en principe très pluvieuses corrélativement à une évaporation intense, quand sont remplies certaines conditions des éléments saisonniers astronomiques (par exemple pour les latitudes tropicales Nord : ε max, $\gamma = 270^o$, e élevé); mais en outre elle met en cause des conditions hydrologiques, en l'espèce les possibilités d'apport d'humidité par les vents océaniques, c'est-à-dire en dernière analyse la température des océans, compte tenu des courants marins et aériens échangeurs de température. On comprend en effet aisément comment *dans une région continentale un été très chaud peut coïncider soit avec une saison très pluvieuse ou au contraire très sèche, suivant que l'apport d'humidité océanique est abondant ou déficient.* La climatologie actuelle abonde en exemples de cette nature où des climats de type équatorial sont peu pluvieux, et que d'autres connaissent des saisons sèches perturbant le schéma classique. Cela nous montre combien le régime pluviométrique et le régime thermique peuvent s'écarter du climat d'insolation, et en même temps combien les interprétations tirées de l'analyse théorique des conditions astronomiques doivent être prudentes puisqu'elles mettent en jeux des bilans thermiques portant sur de vastes régions continentales et océaniques et comment aussi elles ont, faute de données assez bien connues, un certain caractère empirique et subjectif, très loin de la rigueur des données mathématiques de base.

Arrêtons-nous à un exemple. Il y a 33 200 ans d'après Bernard sévissait une grande glaciation antarctique (ε approchant du minimum, $\gamma = 270^o$). L'équateur thermique était alors dans l'hémisphère Sud à $2^o48'$. La chaleur à ces basses latitudes australes devait être particulièrement forte (obliquité faible); on en induirait volontiers une température océanique élevée sous l'équateur géographique où devait alors être établie une période isopluviale à forte pluviosité. Mais suivant l'idée de Bernard, le gradient thermique de l'hémisphère Sud étant alors particulièrement élevé entre un équateur calorifique situé dans l'hémisphère Sud et l'inlandsis antarctique en extension, les brassages des eaux océaniques chaude et froide devaient être intenses, et finalement des courants froids auraient alors baigné les côtes africaines subéquatoriales; le courant froid côtier du Benguela connut une puissance accrue et, en conséquence, un climat d'interpluvial et même de désertification (p. 137) s'étendit sur le bassin congolais faisant connaître à la forêt dense humide une période très critique. Comme nous le voyons, il ne s'agit pas ici de déductions suivant étroitement les données mathématiques, mais d'interprétations non exemptes de doute et de critique, car enfin, l'auteur le reconnaît ailleurs, l'action des courants marins, surtout loin des côtes est mal définissable [1], et il pourra paraître assez audacieux d'admettre

1. L'action climatique désertifiante du courant froid de Benguela s'exerce actuellement dans une bande littorale de l'Ouest africain austral relativement limitée en profondeur. Elle paraît sans influence sur l'intérieur du continent austral. Ce courant

qu'un état désertique s'est instauré en pleine zone équatoriale congolaise en conséquence de l'extension de la calotte glaciaire antarctique [1]. La théorie astronomique de pluviaux et interpluviaux de l'Afrique tropicale permet-elle d'aller jusque-là! Il est permis de ne pas en être immédiatement convaincu.

Il ne peut être envisagé — de toutes façons — de prolonger outre mesure ici une analyse de ces problèmes de paléoclimatologie physique qui ont cependant tant d'importance au point de vue de l'histoire des formations végétales et des flores puisqu'ils sont à l'origine de l'explication de leur distribution actuelle. Mais nous pouvons encore nous poser cette dernière question. Un doute d'une autre nature subsiste encore au sujet des applications de la théorie astronomique des variations climatiques en dépit de la rigueur mathématique de ses déductions. L'objection la plus commune, à laquelle aucun esprit ne peut échapper, est que ce déterminisme d'apparition des glaciations est fondé sur des coïncidences qui ne se sont pas produites seulement à quelques époques du quaternaire mais qui ont du théoriquement se manifester de multiples fois sans périodes fixes au cours de tous les âges géologiques. Or les géologues n'ont retrouvé trace depuis le paléozoïque que de deux grandes glaciations, la glaciation quaternaire (en plusieurs phases) et la glaciation permo-carbonifère de l'hémisphère austral. Comment des glaciations intermédiaires du paléozoïque au cénozoïque n'auraient-elles pas laissé de témoins indiscutables? BERNARD répond par des arguments quantitatifs justifiant ce qu'il appelle la théorie topographique d'un âge glaciaire. L'orogenèse hercynienne en concordance avec l'âge glaciaire permo-carbonifère aurait porté l'altitude moyenne dee continents de 875 m époque actuelle à 1 500 m. Après la pénéplénation de l'ère mésozoïque, depuis le cénozoïque ancien l'altitude moyenne des continents aurait augmenté de 500 m. Ces surélévations auraient entraîné des refroidissements importants qui, en ce qui concerne les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, auraient été à l'époque de l'orogénèse alpine de 8° à 10°. Au cours de ces époques de refroidissement généralisé, les coïncidences mises en lumière par la théorie astronomique, lorsqu'elles se seraient produites à des pseudo-périodes variant entre 10 000 et 100 000 ans, cumulant leurs effets de refroidissement aux précédents auraient alors provoqué ces états glaciaires du permocarbonifère et du pléistocène, qu'elles n'auraient pas suffit à déclancher dans les âges intermédiaires de pénéplanation où le niveau général des continents était abaissé. Cette explication ingénieuse n'est cependant pas pleinement satisfaisante, car il demeure étonnant que la longue

atteint les côtes du sud du Gabon, mais son influence n'est plus décelable dans l'intérieur du Gabon occupé intégralement par une forêt dense humide à caractère très primitif.

1. Il est en revanche plus plausible d'admettre une forte aridification du nord de la cuvette congolaise à une époque où l'équateur calorifique aurait atteint les 10-11° latitude S., les lisières nord de la forêt étant alors vraisemblablement « descendues » vers les 6-7° latitude S.

période orogénique du Tertiaire n'ait abouti qu'au pleistocène à une phase glaciaire. Au surplus un inlandsis austral permo-carbonifère est peu en rapport évident avec les soulèvements hercyniens de l'hémisphère Nord.

Beaucoup de faits donc ne s'accordent pas entièrement avec la théorie astronomique. Si elle n'est pas admise, au moins dans ses conséquences climatologiques, où donc est la faille des raisonnements? Nous avons déjà fait cette observation que la partie de climatologie physique de la théorie n'avait pas le caractère rationnel rigoureux de son développement astronomique mathématique. Le problème des échanges thermiques entre les basses latitudes équatoriales et les hautes latitudes par les courants d'advection aériens et marins, celui de l'albédo des régions équatoriales très humides, très nébuleuses et couvertes souvent d'épaisses forêts comportent beaucoup d'estimations empiriques qui peuvent changer le bilan énergétique et créer des climats thermiques réels différents des climats thermiques théoriques calculés à partir des climats mathématiques d'insolation.

D'autres faits comme les découvertes de gisements fossiles subpolaires, celles du paléomagnétisme rémanent des roches, des changements de direction des vents alizés depuis le Tertiaire, matérialisés dans les sédiments dunaires, de nouvelles théories astrophysiques, amènent à penser que les problèmes de paléoclimatologie n'ont pas encore trouvé de solution définitive dans des causes purement astronomiques et géologiques. Les théories de pulsation climatique du Globe par des changements de rayonnement solaire, par la migration des pôles, par des dérives continentales ont d'ailleurs retenu l'attention critique de Bernard. Nous reproduisons en conclusion cette opinion qu'il exprime ainsi : « Les progrès futurs permettront de décider si les causes astronomiques ont été déterminantes ou non des phases climatiques quaternaires et si les causes invoquées pour les autres théories ont eu des effets appréciables ou négligeables dans l'évolution de ces phases. Au stade actuel des connaissances, le problème est posé. Mais dès à présent nous considérons comme établi que les causes astronomiques ont eu des effets importants qu'on ne peut plus écarter ou sous-estimer ».

Bernard nous a donné un livre d'une extrême richesse de pensée déductive et de documentation dans lequel on trouve une abondante et difficile matière à méditer dont nous n'avons fait qu'extraire quelques parties que ne doivent pas ignorer ceux qui sont intéressés à l'histoire bioclimatique de l'Afrique tropicale, même s'ils ne peuvent en suivre tous les développements mathématiques.

Il apporte des idées sur les changements de climat qui reposent sur des bases quantitatives, il établit des chronologies précises des âges glaciaires, des périodes pluviales et interpluviales. Il a voulu une théorie qui faisant la moindre part à l'imagination soit en concordance satisfaisante avec les faits connus. Y a-t-il réussi? l'avenir le dira peut-être, mais quel que soit le sort qui lui sera réservé, sa tentative mérite une grande attention.